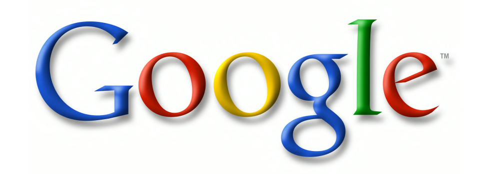
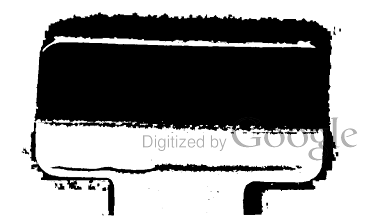

Google

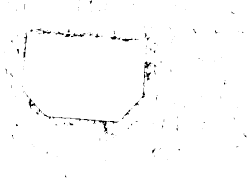





Hermann Th. Simon

Der elektrische Lichtbogen


Digitized by Google



# DER ELEKTRISCHE LICHTBOGEN

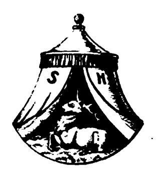
EXPERIMENTALVORTRAG

auf Wunsch
des Wissenschaftlichen Vereins zu Berlin
gehalten am 11. Januar 1911

von

DR. HERMANN TH. SIMON
o. ö. Professor u. Direktor des Instituts für angewandte Elektrizität
an der Universität Göttingen

Mit 31 Figuren und 1 Farbentafel,
sowie 22 Versuchsbeschreibungen




LEIPZIG
VERLAG VON S. HIRZEL
1911

# VORWORT

Mit der Veröffentlichung dieses Vortrages erfülle ich den Wunsch, der mir mehrfach aus dem Hörerkreise geäußert worden ist. Durch die eingehenden Versuchsbeschreibungen, sowie einige Literaturnachweise hoffe ich, den Wert der Zusammenstellung wesentlich gesteigert zu haben.

GÖTTINGEN, März 1911

DER VERFASSER

# Meine Damen und Herren!

Versetzen Sie sich im Geiste etwa 100 Jahre zurück in die Kindheit unseres elektrischen Zeitalters. Volta hatte mit seiner Voltaischen Säule die erste reichlicher sprudelnde Quelle der Elektrizität gefaßt, und überall war man beschäftigt, die neuentdeckte Welt der elektrischen Ströme zu durchforschen und urbar zu machen. Damals geschah es, daß einer zum ersten Male — wahrscheinlich war es Sir H. Davy um 1808 — zwei Kohlenstäbe mit den beiden Polen einer Voltaischen Säule verband, die Kohlen zur Berührung brachte und die glanzvolle Erscheinung beobachtete, die seitdem der elektrische Lichtbogen heißt, und die wir hier vor Ihren Augen entstehen lassen.

**Versuch 1.**

**Zwei Bogenlampenkohlen, am besten in eine Handregulierlampe (Fig. 1) eingespannt, sind, wie Fig. 2 zeigt, durch einen Widerstand mit einer Stromquelle von wenigstens 50 Volt in Verbindung gesetzt. Je größer die Spannung der Stromquelle, desto länger läßt sich der Lichtbogen ausziehen.**



Fig. 1.

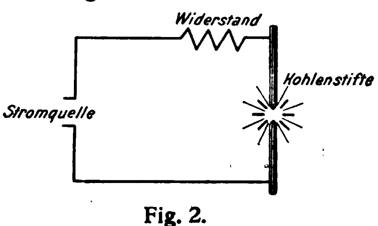



Fig. 2.

Es muß ein wunderbares Gefühl gewesen sein, das den Vater dieses Versuchs bei dem ersten Aufflammen des neugeborenen Lichtes erfüllt hat. Noch heute, so oft wir den Lichtbogen entzünden, fühlen wir ein Stück der Entdeckerfreude jenes ersten Males, als ein menschliches Auge den so unmittelbar aus dem Nichts entstehenden Glanz erschaute.

Wie die Schmetterlinge von seinem Lichte, so haben sich seit jener Zeit die Forscher von dem Rätsel seiner Erscheinung angezogen gefühlt. Schier unzählige Untersuchungen sind ihm gewidmet worden. Und als vor einigen Jahren jemand die Geduld aufbrachte, den wichtigsten Inhalt dieser Untersuchungen gedrängt zusammenzuschreiben, da wurde dieses dickleibige Buch daraus, das Sie in meiner Hand erblicken[1]).

Diese Untersuchungen sind nicht vergebens gewesen. Eine wertvolle Eigenschaft nach der andern wurde am Lichtbogen aufgedeckt, so daß er in unserem elektrischen Zeitalter längst als Diener des täglichen Lebens Anstellung gefunden hat, wo er sich durch Geschicklichkeit und Vielseitigkeit täglich unentbehrlicher zu machen weiß. Und schließlich ist es auch im letzten Jahrzehnt gelungen, den Schleier von dem Geheimnis seines Entstehens zu lüften und zu erkennen, welches die Wurzeln seines Wesens sind.

In drei Stufen pflegt sich jede naturwissenschaftliche Erkenntnis zu vollziehen: Die erste Stufe ist die der

---

[1]) *W. v. Czudnochowski, Das elektrische Bogenlicht, seine Entwicklung und seine physikalischen Grundlagen. Leipzig, S. Hirzel, 1906.*

Beobachtung und wissenschaftlichen Ordnung der Beobachtungsergebnisse. Die zweite Stufe ist die des Ersinnens einer Theorie der beobachteten Erscheinungen: Wir konstruieren dazu aus möglichst einfachen Voraussetzungen ein Gedankenmodell, welches, durch die logischen Gesetze unseres Denkens bewegt, sich möglichst ebenso benimmt, wie es die „zu erklärenden" Erscheinungen tun; indem man dann, rückwärts gerichtet, alle Eigentümlichkeiten des Gedankenmodells durch Experimente in der Natur nachzuahmen versucht, wird die Theorie zur Quelle von Entdeckungen; sie wird zu einer Anweisung, zielbewußte Fragen an die Natur zu stellen und sie zu einer Antwort, so oder so, zu zwingen. Und dann kommt die dritte Stufe, die Anwendung der erforschten Zusammenhänge für die Zwecke des Lebens, die wissenschaftlich geleitete Technik.

Ich will nun, entsprechend diesen drei Entwickelungsstufen, zeigen: I. welche typischen Eigenschaften des Lichtbogens die Beobachtung im Laufe seiner hundert Lebensjahre zutage gefördert hat; II. wie sich diese Eigenschaften theoretisch dem stolzen Gebäude der modernen Elektrizitätstheorie einfügen lassen; und III. wie diese Eigenschaften schließlich Anwendung finden in der heutigen Elektrotechnik. Auf diese Art gewinnt das Bild, das ich Ihnen vom elektrischen Lichtbogen entwerfe, typische Bedeutung. Seine Betrachtung wird zu einem Rundgang durch die wundervoll organisierte Werkstatt, wo der menschliche Geist unaufhörlich die Waffen schmiedet, mit denen er trotz seines schwachen Leibes die blinden Gewalten der Welt besiegt.

I.

Welches sind die wichtigsten Eigenschaften des Lichtbogens? Es wird wohl kein Mißverständnis entstehen, aber die Übersicht erleichtern, wenn wir von ihnen sprechen als von den Fähigkeiten oder Kräften, die dem Lichtbogen innewohnen.

1. Als erste dieser Kräfte fassen wir seine wärmeerregende Kraft ins Auge[1]): Im Lichtbogen findet, wie in jedem von einem elektrischen Strome durchflossenen Leiter, eine fortwährende Umformung von elektrischer Energie in Wärmeenergie statt. Daher nimmt der Lichtbogen und seine Umgebung eine außerordentlich hohe Temperatur an. Das Bild, welches wir vom Kohlelichtbogen auf einem Schirm entwerfen, zeigt die Verteilung dieser hohen Temperaturen durch den Zustand der Kohleelektroden deutlich an. (Siehe Tafel.)

**Versuch 2.**

**Der nach Versuch 1 erzeugte Lichtbogen wird in einen lichtdichten Kasten gebracht, in dessen Wand eine Öffnung geschnitten ist. Vor die Öffnung wird ein photographisches Objektiv gestellt, welches das vergrößerte Bild des Lichtbogens auf einem weißen Schirm entwirft.**

Nach dem Zünden des Lichtbogens steigert sich die Temperatur so lange, bis die durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Wärmeüberführung wegwandernde Wärme der im Lichtbogen hervorgebrachten gleichgeworden ist. Man hat die auf diese Art am Lichtbogen entstehenden Temperaturen gemessen und findet sie an der heißesten Stelle von der Größenordnung 4000° Celsius. Es ist das

[1]) *G. Granquist, Physik. Zeitschr. 4, 557. 1903. M. Reich, Über Größe und Temperatur des negativen Lichtbogenkraters, Physik. Zeitschr. 7, 73, 1906.*

übrigens die höchste, welche wir mit unseren Wärmehilfsmitteln hervorbringen können. Kein Wunder, daß der Hitze des Lichtbogens kein Stoff widersteht. Sie alle schmelzen und verdampfen, wenn man sie in den Bogen hineinbringt; und die Lichtbogenelektroden selbst machen keine Ausnahme davon: Wo sich der Lichtbogen an ihnen ansetzt, sehen wir sie in einem lebhaften Verdampfungszustande begriffen, der sie, meist noch durch Verbrennungsvorgänge unterstützt, allmählich verzehrt.

2. Mit der wärmeerregenden Kraft in enger Beziehung steht die lichterregende Kraft, da ja bei festen Körpern stets Lichtausstrahlung die Folge hoher Temperaturen ist. Die eigentlichen Sitze der lichterregenden Kraft sind denn auch die beiden weißglühenden Ansatzstellen des Lichtbogens. Der Lichtbogen selbst erstreckt sich als schwach blauviolett leuchtende Gassäule zwischen beiden; eine rötliche Aureole von aufsteigenden Verbrennungsgasen hüllt ihn ein. (Siehe Tafel.) Man nennt die Ansatzstellen des Lichtbogens an den Elektroden Krater, weil aus ihnen heraus die violetten Dampfwolken wie aus feuerspeienden Bergen herausgeworfen werden, und weil sich dadurch häufig eine richtig kraterartige Vertiefung ausbildet. Die beiden Krater haben sehr verschiedene Größe und sehr verschiedenes Aussehen: Der mit dem positiven Pol der Batterie verbundene positive Krater erscheint bei dem Kohlenlichtbogen durch besondere Wärme- und Lichterregung vor dem negativen ausgezeichnet. Indessen ist es hier, wie auch sonst wohl im Leben: Nicht was sich vordrängt und brilliert, hat den größten Gehalt. Wir werden finden, daß der

protzige positive Krater nichts ist als ein mehr oder weniger zufälliger Aufputz, während von dem bescheidenen negativen Krater Sein oder Nichtsein des ganzen Lichtbogens abhängt.

Nicht nur zwischen Kohlenspitzen ist der Lichtbogen möglich, sondern, wie man schon lange weiß, auch zwischen Metallelektroden. Sie sehen z. B. hier einen Lichtbogen zwischen Kupferdrähten.

Versuch 3.

**Die Kohlenstäbe des Versuchs 2 werden durch Kupferstäbe ersetzt.**

Hier tritt der positive Krater weniger stark hervor wie beim Kohlebogen.

Das Licht des Kupferbogens ist grün und zeigt im Spektralapparate das Spektrum des Kupferdampfes; ein Beweis, daß der aus den Kratern aufsteigende Elektrodendampf der Träger des Lichtbogenstromes ist. Im Lichte des Kohlebogens findet man entsprechend die Spektrallinien und -banden des glühenden Kohlendampfes, überlagert allerdings von dem regenbogenartigen Spektrum des weißen Kraterlichtes. Noch sprechender tritt die Rolle des Elektrodenmaterials an dem Lichtbogen in Erscheinung, den wir zwischen zwei Quecksilbernäpfen in einem luftleer gepumpten Glasgefäße entstehen lassen.[1]) (Siehe Fig. 3.)

Versuch 4.

**An Stelle des Kupferlichtbogens bei Versuch 3 wird eine kleine hufeisenförmig gebogene Quecksilberlampe gesetzt.**

Hier ist von einem positiven Krater so gut wie nichts mehr zu bemerken, dagegen wirbelt der hellglänzende negative Krater auf der negativen Quecksilber-

[1]) *L. Arons, Ann. d. Phys. (3) 47, 767, 1892; 58, 73, 1896.*

fläche mit einer wahrhaft quecksilberhaften Nervosität hin und her. Da sich alles im Vakuum abspielt, findet zwar eine lebhafte Destillation, aber kein Verbrauch von Elektrodenmaterial statt. Der Lichtbogen allein übernimmt hier wesentlich das Leuchten. Er läßt sich zu großer Länge und Dicke ausziehen und leuchtet mit dem Lichte,

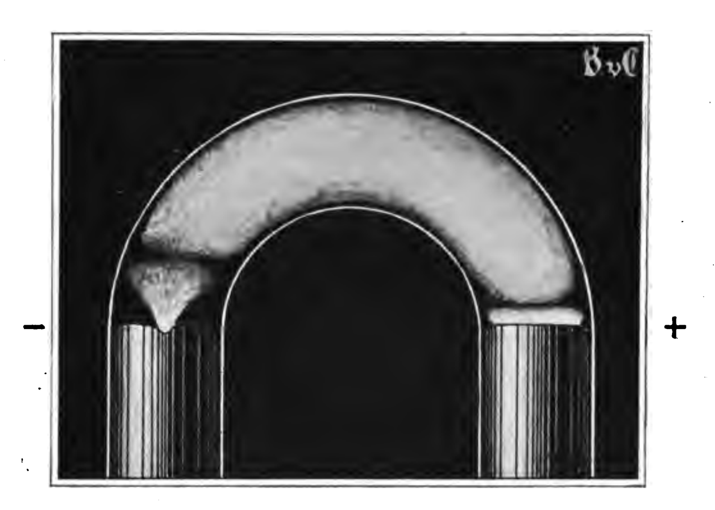



Fig. 3.
Quecksilberlichtbogen (aus Czudnochowski, das elektrische Bogenlicht).

wie es für leuchtenden Quecksilberdampf charakteristisch ist: gelb, grün, violett. Rot fehlt ihm ganz, daher der Farbenumschlag und das leichenhafte Aussehen, dem die Gegenstände bei dieser Beleuchtung verfallen. Sie sehen aus, wie sie sonst bei Betrachtung durch ein blaugrünes Glas erscheinen.

Versuch 5.

**Eine große Quecksilberlampe des gebräuchlichen Typus wird entzündet. Der Farbenumschlag läßt sich an einer aus farbigem Glanzpapier zusammengestellten Farbentafel beobachten.**

Selbst zwischen Stiften aus schwerstschmelzbaren, porzellanartigen Stoffen läßt sich ein Lichtbogen erzielen, z. B. zwischen zwei Stiften jener Masse, aus der die Leuchtstifte der Nernstlampen verfertigt werden. Sie werden erst bei hoher Temperatur für die Elektrizität leitend, daher müssen wir sie anheizen, ehe sie den Lichtbogen geben können. Dann aber zeigen sie einen Lichtbogen mit besonders hellglänzenden Kratern, die durch die wärmeerregende Kraft des Bogens in höchster Weißglut gehalten werden.

**Versuch 6.**

**In die Elektrodenhalter des Versuchs 3 werden mit Hilfe einer Messingfassung zwei etwa 1 cm lange Stückchen eines Nernst-Stiftes eingesetzt. Nach kräftigem Anheizen mit dem Bunsenbrenner läßt sich der Lichtbogen entzünden.**

3. Wir wenden uns jetzt zu einer Eigenschaft des Lichtbogens von ganz anderer Art, zu seiner schallerregenden und schallverzehrenden Kraft. Beide wurden erst vor rund 12 Jahren entdeckt[1]), obwohl man sich wundern muß, daß sie sich solange der Beobachtung entziehen konnten. Denn die schallerregende Kraft wenigstens drängt sich frech genug in die Erscheinung. Die Sache ist kurz die: Man leitet über den Lichtbogen einen elektrischen Strom der Art, wie er in einem Mikrophonkreise durch das Sprechen gegen die Mikrophonmembrane erregt wird. Durch den Lichtbogen fließt dann ein Strom, der im Rhythmus der Schallwellen des gesprochenen Wortes auf- und abflutet. Ähnlich als ob man auf

[1]) *H. Th. Simon, Akustische Erscheinungen am elektrischen Flammenbogen, Wied. Ann. 64, 233, 1898. Phys. Zeitschrift 2, 253, 1901.*

einem glatt dahinströmenden Flusse Wellen erregte, die dann mit dem Strome dahingetragen werden. Alsdann löst sich dem Lichtbogen die Zunge, und er spricht laut und klar alles wieder, was man jenem Mikrophon anvertraute.

Versuch 7.

**Am besten nach Schaltungsschema Fig. 4. Als Selbstinduktion dient eine Drosselspule mit recht vielen Windungen und genügend großem Eisenkern (z. B. Primärspule eines Transformators). Die Kapazität (5—10 Mikrofarad) kann meist wegbleiben, namentlich, wenn man mit Batterie arbeitet. Man verwendet salzgetränkte Dochtkohlen und wenigstens 100 Volt Betriebsspannung, so daß sich ein recht langer Lichtbogen ausziehen läßt. Stromstärke 10—20 Ampere. Sehr gut arbeitet das Kapselmikrophon von Mix und Genest.**

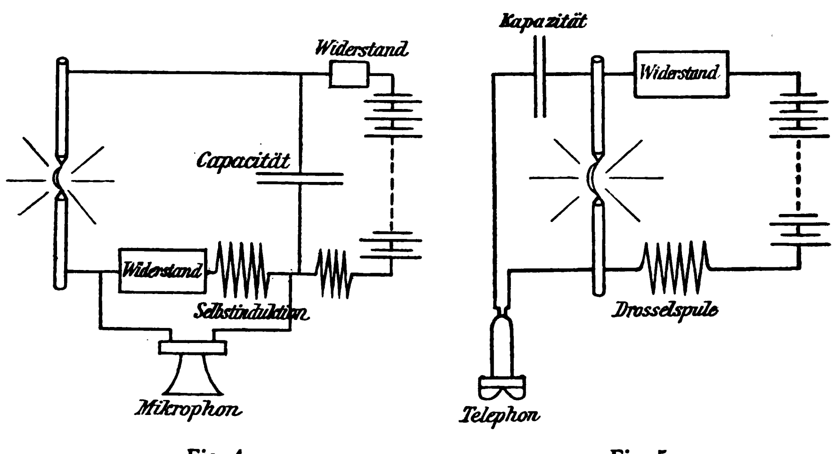



Fig. 4.

Fig. 5.

Umgekehrt: Konzentriert man Schallwellen auf einen Lichtbogen, so nimmt er, als ob er Ohren hätte, einen Teil des Schalles auf und wandelt ihn in sprechende Ströme, die sich in einem geeignet angeschlossenen fernen Telephon wieder in Sprache verwandeln lassen.

**Versuch 8.**

**Der Versuch mit dem lauschenden Lichtbogen gelingt sehr gut nach Schaltung Fig. 5. Um Nebengeräusche auszuschließen, ist Batteriebetrieb erwünscht. Hier sind kurze Lichtbögen von nicht zu großer Stromstärke (5—10 Ampere) am besten, auf die man mittelst eines Trichters den Schall konzentriert. Kapazität wieder 5—10 Mikrofarad.**

4. Als der englische Physiker Duddell sich im Jahre 1900 im Zusammenhange mit anderen schönen Lichtbogenuntersuchungen[1]) bemühte, recht wirksame Schaltungen für den Versuch des sprechenden Lichtbogens auszuprobieren, fand er wiederum eine neue und überaus merkwürdige Kraft des Lichtbogens: seine schwingungserregende Kraft. Folgendes ist der Versuch Duddells (s. Fig. 6): Der Strom, der durch den Lichtbogen fließt,

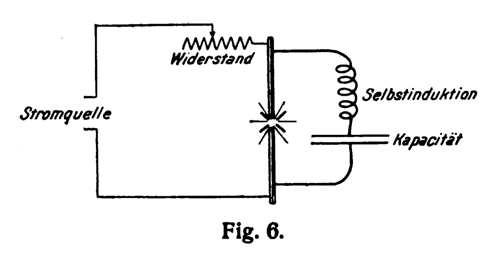


Fig. 6.

wird durch eine mehr oder weniger gewundene Nebenleitung (Selbstinduktion) in einen sogenannten Kondensator (Kapazität) abgezweigt, einen Apparat, der aus zwei mehr oder weniger großen, durch einen Isolator voneinander getrennten Metallflächen besteht. Dann beginnt der Lichtbogen einen lauten und klaren Ton hören zu lassen.

---

[1]) *W. Duddell, The Electrician Nr. 8 u. 9, 1900; Physik. Zeitschr. 2, 425 u. 440, 1901.*

### Versuch 9.

**Lichtbogen zwischen Homogenkohlen (etwa 4 mm Durchmesser). Betrieb mit wenigstens 220 Volt. Günstigste Stromstärke (etwa 2—3 Ampere) und Bogenlänge (etwa 2—3 m/m) muß ausprobiert werden. Als Kapazität sind 5—10 Mikrofarad erforderlich. Als Selbstinduktion wählt man etwa 50 Windungen einer biegsamen umsponnenen Leitungsschnur, die auf einen horizontal eingespannten Glas- oder Holzstab gehängt werden. Durch Auseinanderziehen und Zusammenpressen der Windungen ändert sich die Höhe der Lichtbogentöne. Ebenso, wenn man einen Eisenkern in die Windungen einführt, oder wenn man Kapazität zu- und abschaltet.**

Nach unseren Erfahrungen über die schallerregende Kraft des Lichtbogens schließen wir, daß sich durch das Vorhandensein jener Nebenleitung ein auf- und abflutender Wechselstrom über den Gleichstrom des Lichtbogens überlagert. Sein Rhythmus oder seine Schwingungszahl hängt, wie wir an dem entstehenden Tone leicht verfolgen, von der Beschaffenheit des Nebenweges ab: Winden wir den Draht enger, so wird der Ton tiefer, die Schwingungszahl des Wechselstroms wird kleiner. Ebenso wenn wir Eisen in die Nähe bringen. Endlich auch, wenn wir die Flächen der Kondensatorbelegungen vergrößern oder auch einander nähern. Und das alles hängt so zusammen: Man weiß seit lange, daß die Elektrizität in einem Stromkreise von der Art unseres Nebenweges elektrische Schwingungen machen kann, genau so, wie eine Violin- oder Klaviersaite oder auch die Luft in einem Rohre Tonschwingungen macht, wenn man sie anstößt. In diesen Fällen kommen die Schallschwingungen durch gleichzeitig vorhandene Elastizität und träge Masse der schwingenden Körper zustande. Ihre Schwingungszahl wird durch die Werte dieser beiden Größen bestimmt. Ein Kondensator

nun verleiht der Elektrizität ähnliche Eigenschaften, wie sie die Körper durch ihre Elastizität besitzen; eine gewundene Drahtleitung andererseits, sowie die Nachbarschaft von Eisen verleihen ihr ähnliche Eigenschaften, wie sie die Körper durch ihre träge Masse haben. Beides gleichzeitig verleiht ihr die Fähigkeit, Schwingungen zu vollführen, wenn man ihr einen Anstoß dazu gibt. Unser Versuch ist der Beweis dafür. Er zeigt dann aber weiter, daß der Lichtbogen imstande ist, in dem mit ihm verbundenen schwingungsfähigen Kreise zu dauernden elektrischen Schwingungen Anstoß zu geben. Kurz, daß er eine schwingungserregende Kraft besitzt.

Mit Hilfe der schallerregenden Kraft erzeugen diese elektrischen Schwingungen Töne, die man durch Veränderung der elektrischen Elastizität und der elektrischen Masse mit beliebiger Tonhöhe hervorbringen und musikalisch verwerten kann.

### Versuch 10.

**Man schaltet eine Anzahl von Selbstinduktionsspulen so wie in Fig. 7 hintereinander, schaltet die Kombination als Selbstinduktion in den Schwingungskreis der durch Fig. 6 dargestellten Versuchsanordnung und verbindet die Punkte a . . . h mit einer Art von Tastatur, deren Tasten beim Niederdrücken Kontakt mit der Sammelschiene machen. Gleicht man die Selbstinduktionsspulen geeignet ab, so erhält man eine Tonleiter, die sich wie ein Klavier spielen läßt.**

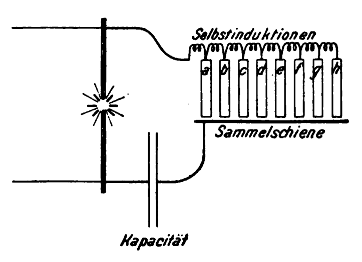



Fig. 7.

5. Mit alledem sind die Kräfte des Lichtbogens noch nicht erschöpft. Ja vielleicht ist es gerade seine aussichtsreichste, die noch zu nennen übrig bleibt, ich meine seine stickstoffbindende Kraft. Ein Gemisch von Stickstoff und Luft nämlich verbrennt im Lichtbogen zu Stickoxyden, so daß es auf diese Art gelingt, den Stickstoffreichtum der Atmosphäre zu binden und zur Steigerung des Bodenertrages in der Landwirtschaft dienstbar zu machen. In gewaltigem Maßstabe hat man begonnen, diese noch nicht lange bekannte Kraft des Lichtbogens heranzuziehen. Und der Segen, der aus dieser seiner Fähigkeit erwachsen kann, ist gar nicht zu ermessen. Doch muß ich mich begnügen, auf diese Fähigkeit des Lichtbogens hingewiesen zu haben, auf die neben allen anderen näher einzugehen, mir die verfügbare Zeit nicht gestatten würde[1]).

---

Alle die geschilderten Eigenschaften des Lichtbogens sind mit einem bestimmten elektrischen Verhalten verknüpft, dem wir jetzt unsere Aufmerksamkeit zuwenden müssen. Wir erinnern uns daran, daß jedem durch einen Apparat fließenden elektrischen Strome eine Stromstärke zukommt, womit man die in der Sekunde ein- und wiederaustretende Elektrizitätsmenge bezeichnet. Wir messen diese Stromstärke nach Ampere, so wie wir z. B. Wasserströme nach Sekundenliter messen können. Auch gibt es

[1]) *Genaueres hierüber siehe J. Zenneck, Die Verwertung des Luftstickstoffs mit Hilfe des elektrischen Flammenbogens. Leipzig, bei S. Hirzel, 1911.*

Instrumente, die Amperemeter, deren Zeiger die Amperezahl des Stromes in jedem Falle auf einem Zifferblatte anzeigen, sobald man den betreffenden elektrischen Strom durch die Drähte des Instrumentes hindurchfließen läßt.

Die Stromstärke ist nur die eine von den beiden Größen, welche die elektrische Strömung durch einen Apparat charakterisieren. Die andere ist die Spannungsdifferenz, die der Strom zwischen den Polen des Apparates besitzt: Indem die Elektrizität unseren Apparat durchströmt, erfährt sie eine Änderung ihres Arbeitswertes, der eben durch die Spannungsdifferenz gemessen wird. Auch das hat beim strömenden Wasser seine Analogie: Bei dem Eintritt in eine Mühle hat das Wasser durch sein höheres Schwereniveau eine größere Arbeitsfähigkeit wie bei dem Austritt. Es hat den Unterschied inzwischen ja verwendet, um in der Mühle allerlei nützliche Arbeit zu verrichten. Je höher der Unterschied des Schwereniveaus und je größer die Wasserstromstärke ist, desto größer ist die in der Mühle geleistete Arbeit. Das Produkt Wasserstromstärke mal Fallhöhe ergibt die in der Sekunde von dem Wasser geleistete Arbeit, z. B. in Kilogrammetern pro Sekunde.

Genau so steht es mit dem elektrischen Strome in unserem Apparate: Sein Arbeitsniveau oder seine Spannung wird in dem Apparate mehr oder weniger verändert, er erfährt eine Spannungsdifferenz in ihm, die wir nach Volt messen, wie wir sie bei der Mühle nach Metern messen konnten. Und wieder gibt es Instrumente, deren Zeiger die Spannungsdifferenz, die der Apparat hervorbringt, auf einem Zifferblatte anzeigen. Man braucht

nur die Pole des Instrumentes durch zwei Drähte mit den Polen des Apparates zu verbinden. Wir machen den Versuch z. B. mit einer Glühlampe (Versuch 11), und finden, daß sie bei einer Stromstärke von 0,5 Ampere einen Spannungsabfall von 110 Volt zeigt. Der elektrische Strom verliert also in der Glühlampe 55 Watt oder Voltampere an Arbeitsfähigkeit, die hier dazu verwendet werden, den Draht dauernd auf seiner Leuchttemperatur zu erhalten.

**Versuch 11.**

Glühlampe
Voltmeter
Amperemeter
Stromquelle
Regulierwiderstand

Fig. 8.

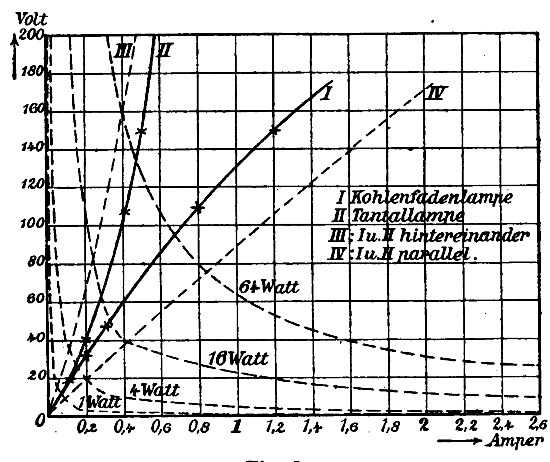



Fig. 9.

Derartige Messungen zeigen, daß bei jedem Apparate zu jedem Stromstärkewert eine bestimmte Spannungsdifferenz gehört, und daß die Art, wie sich diese beiden Bestimmungsgrößen einander zuordnen, den elektrischen Charakter des betreffenden Apparates lebendig zum Ausdruck bringt. Mit einem Blick übersieht man diesen Charakter durch die graphische Darstellung jener Zuordnung in der sogenannten charakteristischen Kurve, wie sie in Fig. 9 für einige Glühlampen dargestellt ist.

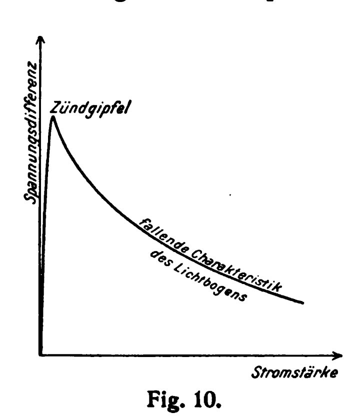


Fig. 10.

Beim Lichtbogen ergeben sich Kurven von dem in Fig. 10 dargestellten Typus.

Man sieht: um überhaupt einen Strom durch eine Lichtbogenstrecke zu treiben, erfordert es zunächst sehr hoher Spannungen. Ist dieser Strom erst einmal über einen gewissen Wert gekommen, so setzt der Lichtbogen ein, seine Spannungsdifferenz sinkt und wird immer kleiner, je größer die Stromstärke gemacht wird. Wir sagen darum: Die Lichtbogencharakteristik habe einen „Zündgipfel“ und sei „fallend“. Genaue Charakteristiken von Lichtbogenstrecken verschiedener Länge zeigt das Diagramm Fig. 11 (nach H. Ayrton). Mit zunehmender Bogenlänge rücken die Kurven zu höheren Spannungswerten hinauf. Auf andere Abhängigkeiten der Lichtbogencharakteristik von den besonderen Betriebsbedingungen, z. B. von der Art und dem Druck des umgebenden Gases, von der Art des

verwendeten Stiftmaterials und zahlreichen anderen Einflüssen, die man untersucht hat, will ich hier nicht ein-

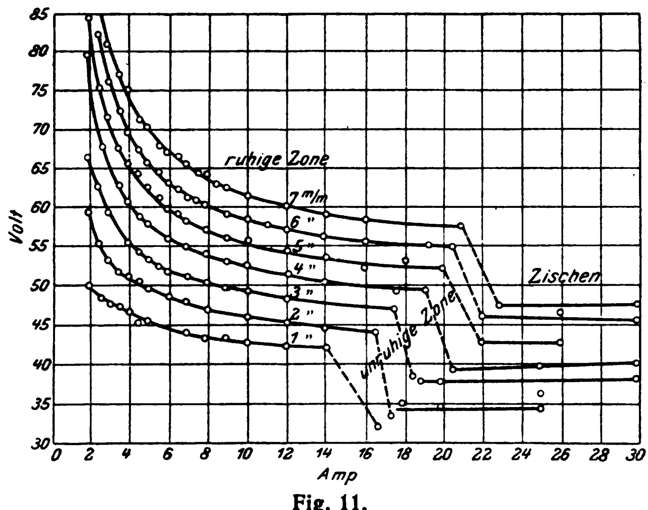



Fig. 11.

gehen.[1]) Es genügt für unsere Zwecke, den allgemein gültigen Typus der Lichtbogencharakteristik festgelegt zu haben. Wir haben damit nämlich die erforderliche wissenschaftliche Ordnung der Beobachtungsergebnisse gewonnen; eine Art von Passepartout, der dem Kenner fast alle Türen des Lichtbogenhauses aufschließt. Zum Beispiel:

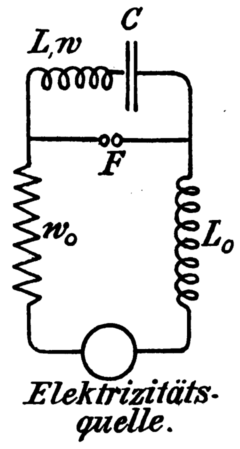



Fig. 12.

Der Zündgipfel der Charakteristik spielt eine sehr wichtige Rolle in dem Gebiete der elektrischen Schwin-

[1]) *Vgl. z. B. H. Th. Simon u. W. Malcolm, Phys. Zeitschr. 8, 471, 1907.*

gungen. Denken Sie sich wieder (siehe Fig. 12) ein System aus einem elektrischen Kondensator C und einer gewundenen Drahtleitung Lw, in dem ja, wie wir sahen, elektrische Schwingungen erregt werden können. Wir unterbrechen die Drahtleitung an einer Stelle durch eine sogenannte „Funkenstrecke“ F und verbinden ihre Enden durch einen Widerstand $w_0$ mit einer Elektrizitätsquelle genügend hoher Spannung. Die Folge ist, daß sich die Kondensatorbelegungen mit entgegengesetzten Ladungen laden, und daß damit die Spannungsdifferenz an den Elektroden der Funkenstrecke allmählich wächst. Sobald sie so hoch geworden ist, daß der Zündgipfel der Charakteristik überklettert wird, setzt ein Lichtbogen zwischen den Elektroden ein. Er macht alsbald, als Folge des Falles der Charakteristik, die Gasstrecke zu einem guten Leiter, durch den sich nun die entgegengesetzten Ladungen der Kondensatorbelegungen ausgleichen. Sie tun das wegen der gleichzeitig vorhandenen elektrischen Elastizität und Trägheit durch elektrische Schwingungen: Die Elektrizität pendelt von einer Kondensatorplatte zur anderen hin und her, bis ihre ganze Energie in der Leitung in Wärme verwandelt ist. Darnach ladet sich der Kondensator aufs neue, und es erfolgt ein neuer Anstoß.

### Versuch 12.

Als Beweis für das Auftreten der Schwingungen dient das Aufleuchten einer Geißlerröhre in der Nähe der Selbstinduktionsspule L des schwingenden Kreises. Bewegt man sie schnell hin und her, so erkennt man, daß die Röhre immer nur beim Einsetzen eines Funkens aufleuchtet. Am besten ist es, die Geißlerröhre, wie Fig. 13 zeigt, auf die Achse eines Motors zu befestigen, der sie dann als Radius eines Kreises herumschleudert. Konzen-

**trisch zur Motorachse A wird ein Drahtring R aufgestellt, der mit einer auf den Schwingungskreis LC abgestimmten Resonanzspule S verbunden ist; der Pol a der Geißlerröhre wird mit der Motorachse metallisch verbunden und der ganze Motor geerdet. Wenn der Motor rotiert, leuchten n u r e i n i g e w e n i g e R a d i e n des Kreises auf.**

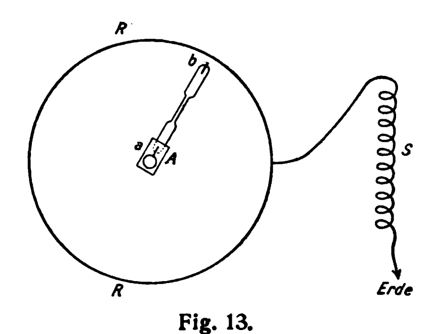



Fig. 13.

Dieser Versuch ist die Grundlage des ganzen Gebietes der elektrischen Schwingungen, und aus ihm hat sich die drahtlose Telegraphie entwickelt. Der Zündgipfel der Lichtbogencharakteristik ist also ebenfalls die Ursache einer schwingungserregenden Kraft des Lichtbogens, die übrigens, wie wir sehen werden, mit der früher besprochenen in einem sehr nahen Zusammenhange steht.

Wir sahen vorhin, daß der Zündgipfel mit kürzer werdender Lichtbogenstrecke immer niedriger wird. Machen wir daher die Lichtbogenstrecke nur kurz genug, so ist schon eine relativ kleine Spannungsdifferenz imstande, dem Strom über den Zündgipfel zu helfen. Darauf beruht die gewöhnlich geübte Methode, einen Lichtbogen in Gang zu bringen, in dem man die Elektroden für einen Moment zur Berührung bringt. — Statt dessen können wir aber auch für einen Moment die Spannung erhöhen. Das tun wir z. B. hier bei folgendem Versuch

(Versuch 13): Wir erzeugen auf der einen Seite des Hörsaales (Geberseite) elektrische Schwingungen in einem Drahte, die auf der anderen Seite (Empfangsseite) von einem entsprechenden Drahte aufgefangen werden, um dort nach dem Prinzipe der drahtlosen Telegraphie durch

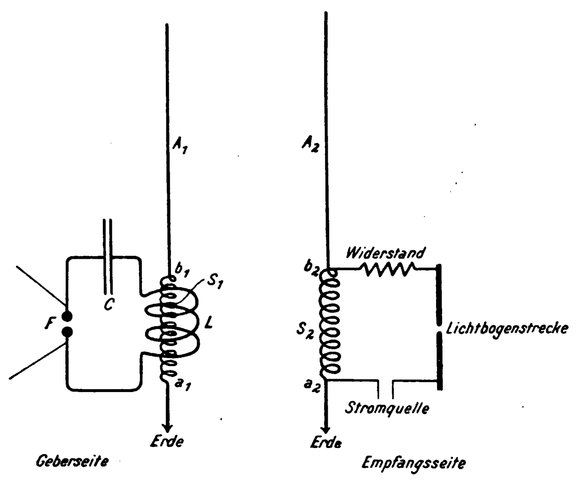



Fig. 14.

Resonanz ebenfalls eine elektrische Schwingung zu erregen. An die Enden des schwingenden Drahtes schließen wir eine Lichtbogenstrecke, die wir außerdem mit den Polen einer 100voltigen Batterie verbinden. Sobald die Schwingungen erregt werden, und durch Änderung der elektrischen Elastizität Resonanz hergestellt wird, fängt der Lichtbogen an zu brennen: Die durch die elektrischen Wellen vorübergehend erzeugte hohe Spannungsdifferenz hat dem Strome über den Zündgipfel der Charakteristik hinweggeholfen. —

### Versuch 13.

**In Fig. 14 sind $a_1 b_1$, $a_2 b_2$ zwei gleichartige Spulen aus etwa 600 Windungen eines 0,5 mm dicken seidenumsponnenen Drahtes, der auf**

**Papptrommeln von 20 cm Durchmesser und 50 cm Länge aufgewickelt ist. Auf der Senderseite ist CL der durch ein Induktorium erregte Schwingungskreis, in dem unter Vermittlung der Funkenstrecke F elektrische Schwingungen erregt werden. L besteht aus 5—6 Windungen von etwa 30 cm Durchmesser, welche die Spule $S_1$, wie in Fig. 14 angedeutet, umgeben. $S_1$ wird bei $a_1$ geerdet, bei $b_1$ mit einem einige m langen Antennendraht $A_1$ verbunden. Bei Abstimmung des Schwingungskreises auf die Eigenschwingung der Spule $S_1$ strahlt der Draht $A_1$ elektromagnetische Wellen aus. Diese erregen in der mit dem Draht $A_2$ verbundenen, bei $a_2$ geerdeten Empfangsspule $S_2$ Eigenschwingungen, falls man sie durch Änderung der Drahtlänge $A_2$ mit den ankommenden Wellen in Resonanz bringt. Wird nun der Lichtbogen, wie Fig. 14 zeigt, mit seiner Stromquelle zur Spule $S_2$ parallel gelegt und ein Elektrodenabstand von etwa 1—2 mm eingestellt, so setzt der Lichtbogen ein, sobald der Sender zu Schwingungen angeregt wird. Stellt man $A_2$ so ein, daß die Eigenschwingungszahl von $S_2$ höher ist, als der Resonanz entspricht, und setzt dann den Sender in Tätigkeit, so entzündet sich der Lichtbogen erst, wenn man durch Annähern der Hand an $S_2$ die Kapazität und damit die Schwingungszahl bis zum Resonanzwerte vergrößert. Immer ist es die durch die Schwingungen an der Spule $S_2$ auftretende Spannungsdifferenz, welche der am Lichtbogen liegenden Gleichspannung über den Zündgipfel hinüber hilft.**

Sie sehen, wir könnten einen Lichtbogen auf diese Art als „Detektor“ für elektrische Wellen benutzen. In der Tat beruhen einige im Gebrauche befindliche Apparate zum Nachweise elektrischer Wellen auf einem analogen Prinzipe, z. B. die sogenannten Kohärer.

---

Das Verhalten des Lichtbogens als Funkenstrecke zur Erregung von elektrischen Schwingungen leitet zu einer weiteren wichtigen Frage hinüber.

Bisher haben wir nämlich immer den sogenannten Gleichstromlichtbogen betrachtet, wie er von einer Gleichstromquelle erzeugt wird, die dauernd in derselben

Richtung Strom durch die Leitungen treibt. Nun gibt es aber auch Wechselstromquellen, die einen hin- und herpendelnden Strom durch die Leitungen jagen. Gerade sie gewinnen in der neueren Zeit immer mehr Bedeutung für die großen Elektrizitätsanlagen, durch die man ausgedehnte Gebiete mit elektrischer Energie versorgt. Wie stellt sich unser Lichtbogenphänomen zu diesen Strömen? Ist es möglich, daß auch Wechselspannungen einen Lichtbogen erzeugen?

Ein Versuch gibt bei Verwendung von Kohlenelektroden die Antwort ja, wobei der entstehende Lichtbogen durch lautes Brummen wieder seine schallerregende Kraft bewährt.

**Versuch 14.**

**Dieselbe Anordnung wie bei Versuch 1 u.2, nur daß eine Wechselstromschine von ca. 100 Volt Spannung als Stromquelle gewählt wird.**

Bei Metallelektroden aber versagt unser Bemühen, es sei denn, daß wir die Wechselspannung zwischen so hohen Grenzen hin- und herpendeln lassen, daß die umkehrende Spannung dem Strome jedesmal wieder über den Zündgipfel hinweghelfen kann, also jedesmal den Lichtbogen neu zündet.

**Versuch 15.**

**Dieselbe Anordnung wie bei Versuch 14, doch wird der Wechselstrom durch einen Transformator auf einige Tausend Volt transformiert, ehe er mit den Lichtbogenelektroden verbunden wird. In diesem Falle erhält man auch zwischen Metallelektroden einen dauernden Wechselstromlichtbogen, der sich zu erheblicher Länge ausziehen läßt.**

Wir haben indessen schon einen Fall kennen gelernt, wo auch zwischen Metallelektroden ein Wechselstromlicht-

bogen niedriger Spannungsdifferenz unterhalten wird. Bei den elektrischen Schwingungen nämlich, wie wir sie in unserem Kondensatorkreise durch eine metallische Funkenstrecke erregten (Fig. 12), bleibt der einmal gezündete Lichtbogenfunken bestehen, bis die Schwingungen zu sehr niedrigen Spannungswerten abgeklungen sind. Die elektrischen Schwingungen unterscheiden sich von den gewöhnlichen Wechselströmen nur durch die Schwingungszahl, die bei diesen in der Sekunde die Größenordnung 50, bei jenen die Größenordnung 1000000 hat. Wir schließen, daß eine Wechselspannung niedriger Spannung einen Lichtbogen zwischen Metallelektroden nur dann zu unterhalten vermag, wenn die Schwingungszahl auf einen genügend hohen Wert gebracht wird.

In jedem Falle widerspricht vieles von diesen Beobachtungen dem durch unsere Charakteristiken angezeigten elektrischen Verhalten des Lichtbogens, welches eine Lichtbogenzündung mit so niedrigen Spannungen überhaupt als unmöglich ergeben hat.

Wie löst sich diese Schwierigkeit? Hierüber gaben Untersuchungen Aufschluß, die seit dem Jahre 1901 im Göttinger Institut für angewandte Elektrizität angestellt worden sind.[1]) Ihr Ergebnis ist, kurz gesagt, daß die Charakteristiken des Lichtbogens bei Wechselstrombetrieb andere sind als bei Gleichstrom.

Wir wollen die Änderungen, die unsere Gleich-

---

[1]) *H. Th. Simon, Über die Dynamik der Lichtbogenvorgänge und über Lichtbogenhysteresis, Physik. Zeitschr. 6, 297, 1905.*

stromcharakteristik bei Wechselstrombetrieb erfährt, vor Ihren Augen entrollen, indem wir die Strom- und Spannungskurven eines Wechselstromlichtbogens auf einem Schirme sichtbar machen. Das geschieht mit Hilfe sogenannter Oszillographen, d. h. von Amperemetern und Voltmetern, deren Lichtzeiger jeder Änderung von Stromstärke und Spannungsdifferenz zu folgen vermögen. Gleichzeitig werden durch einen rhythmisch bewegten Spiegel die zeitlich aufeinander folgenden Zeigerausschläge räumlich nebeneinander ausgebreitet; wir erhalten Kurven, wie sie z. B. in Fig. 15 wiedergegeben sind.

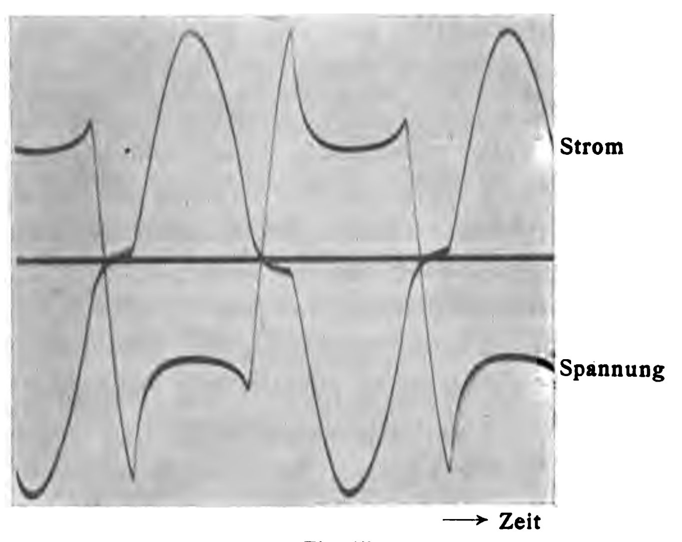



Fig. 15.

Zeichnen wir aus solchen unter den verschiedensten Bedingungen beobachteten Kurven die Charakteristiken, so ergeben sich Formen vom Typus der Fig. 16.

Die Vergleichung bei wechselnden Betriebsbedingungen zeigt:

Nur bei ganz langsamen Wechseln gilt auch bei Wechselstrom die Gleichstromcharakteristik, andernfalls werden bei wachsendem Strome höhere Spannungs-

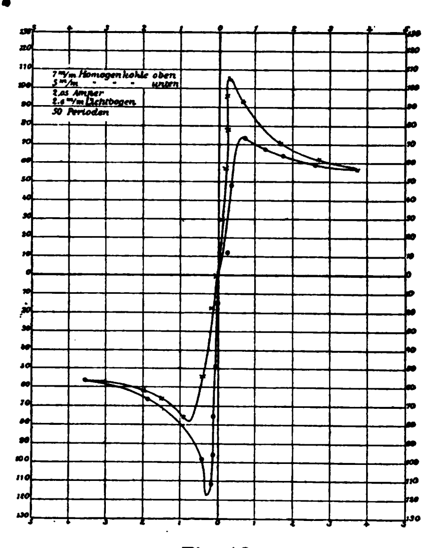



Fig. 16.

werte durchlaufen wie bei abnehmendem. Dabei wird mit zunehmender Schwingungszahl der Zündungsgipfel mehr und mehr abgetragen, so daß bei genügend hoher Schwingungszahl überhaupt kein Zündungsgipfel mehr zu überwinden ist, und schon eine niedrige Wechselspannung den Wechselstromlichtbogen dauernd unterhält. Siehe Fig. 17. Bei Metallen sind zu dem Abtragen der Zündgipfel weit höhere Schwingungszahlen erforderlich als bei Kohle. Ferner: Bei gleichbleibender Schwingungszahl wachsen mit zunehmender Bogenlänge die Zündgipfel wieder in

die Höhe, so daß also zu jeder Wechselspannung eine Bogenlänge existiert, über die hinaus kein Wechselstrombogen unterhalten werden kann (Fig. 18).

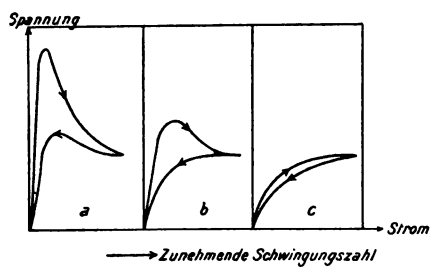


Fig. 17.

Schließlich: Halten wir Schwingungszahl und Bogenlänge fest, verkleinern aber durch Vergrößerung des Vorschaltewiderstandes die maximale Stromstärke, so nimmt

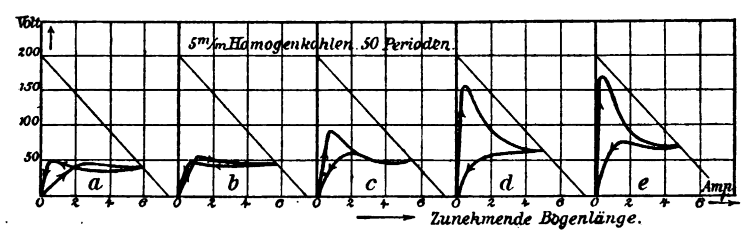


Fig. 18.

die Höhe des Zündungsgipfels wiederum zu (Fig. 19 zeigt das an den Strom- und Spannungskurven, Fig. 20 an den Charakteristiken).

Die Gesamtheit dieser Änderungen, auf deren Ursachen wir später zurückkommen werden, läßt sich in Analogie zu ähnlichen Vorgängen auf anderen Gebieten der Physik mit Lichtbogenhysteresis bezeichnen. Wir wollen uns weiterhin dieses kurzen Ausdrucks bedienen.

Von den Konsequenzen der Lichtbogenhysteresis sei vor allem die für die schwingungserregende

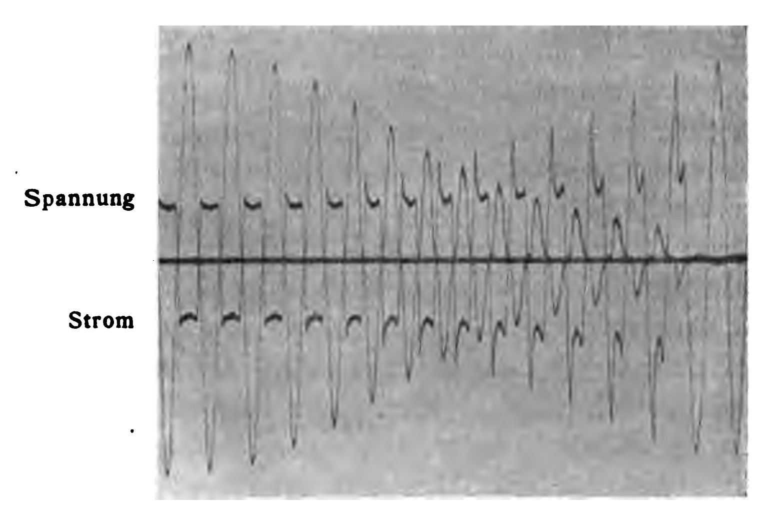



Fig. 19.

Kraft des Lichtbogens besprochen, weil ihre Untersuchung von diesem Problem seinen Ausgang genommen

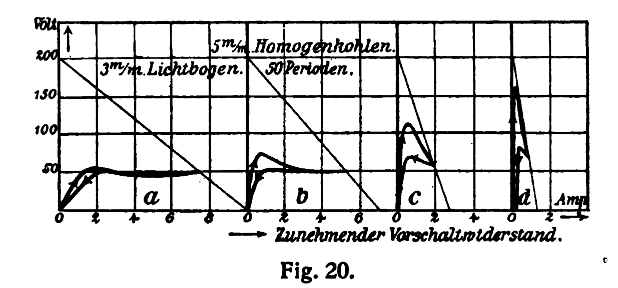



Fig. 20.

hat. Nämlich: Für den auf dem Gebiete der elektrischen Schwingungen Kundigen hatte der Duddellsche Versuch (Versuch 9, Seite 11) gewaltige Perspektiven eröffnet. Bis dahin

konnte man elektrische Schwingungen nur nach dem oben geschilderten Verfahren erzeugen, bei dem durch eine Lichtbogenzündung in einer Funkenstrecke die Eigenschwingung eines Kondensatorkreises angestoßen wird (Versuch 12, Seite 18). Die entstehenden Schwingungen sind gedämpfte, wie die einer gezupften Violinsaite: Sie klingen bald ab und müssen dann durch einen neuen Funken neu angestoßen werden. Da erwies der Duddellsche Versuch zum ersten Male die Möglichkeit, ungedämpfte, d. h. dauernd gleichbleibende elektrische Schwingungen zu machen; analog den Tönen, wie sie eine gestrichene Violinsaite erzeugt oder wie sie bei den Orgelpfeifen durch einen kontinuierlichen Luftstrom hervorgerufen werden. Wer aber solche ungedämpfte elektrische Schwingungen erzeugen konnte, der mußte die drahtlose Telegraphie sofort auf eine neue Stufe erheben können. Er mußte den elektrischen Wellen eine bis dahin unbekannte Abstimmungsfähigkeit erteilen, ja, er mußte sofort die drahtlose Telephonie verwirklichen können, von der bis dahin noch keine Rede sein konnte.

Die Darlegung dieser Situation 1901 in einer Denkschrift an das Kuratorium der Charlottenburger Jubiläumsstiftung hatte den Erfolg, daß für die notwendigen Arbeiten zweimal erhebliche Mittel bereit gestellt wurden, was ich bei dieser Gelegenheit gern mit herzlichem Dank erwähne. Worin lag denn aber die Schwierigkeit des Problems? Nun, es zeigte sich, daß die Schwingungszahl der ungedämpften Schwingungen mit der Duddellschen Anordnung nicht über die Zahl von etwa 40000 in der Sekunde gesteigert werden konnte, während die Zwecke

der drahtlosen Telegraphie wenigstens 100000 und mehr Schwingungen erforderten. Man mußte also Versuchsanordnungen suchen, die auch so hohen Schwingungszahlen gegenüber wirksam blieben.

Dazu führten folgende Überlegungen: Die von Duddell entdeckte schwingungserregende Kraft des Lichtbogens zeigt sich eng mit der Tatsache verbunden, daß seine Charakteristik eine fallende ist, d. h. daß mit zunehmender Stromstärke seine Spannungsdifferenz kleiner wird, und umgekehrt. Legt man den schwingungsfähigen Nebenkreis an den Lichtbogen an, so strömt ein Teil des Stromes auf die Belegungen des Kondensators, die Stromstärke des Lichtbogens nimmt ab, und die Spannungsdifferenz nimmt daher zu. Da diese Spannungsdifferenz es ist, welche den Strom in den Kondensatorkreis hineintreibt, so wirkt ihre Zunahme so, als übe man noch einen besonderen Stoß auf die in den Kondensator fließende Elektrizität aus. Das Entsprechende tritt auf, wenn sich der Kondensator durch den Lichtbogen entladet: Der Lichtbogenstrom nimmt zu, seine Spannungsdifferenz ab, und es wird jetzt eine Saugwirkung auf den Nebenkreis ausgeübt. Ohne diese vom Lichtbogen ausgeübten Stoß- und Saugwirkungen würde der Ladungsstrom des Kondensators in gedämpften Schwingungen abklingen. Durch sie wird, wenn sie groß genug sind, aus einer gedämpften Ladeschwingung eine ungedämpfte Schwingung, wie wir sie beobachteten.

Wie aber kommt es jetzt, daß bei höheren Schwingungszahlen die schwingungserregende Kraft versagen kann? Dafür ist eben die Lichtbogenhysteresis verant-

wortlich. Wie sie sich hier äußert, sieht man wieder am besten an den Charakteristiken:

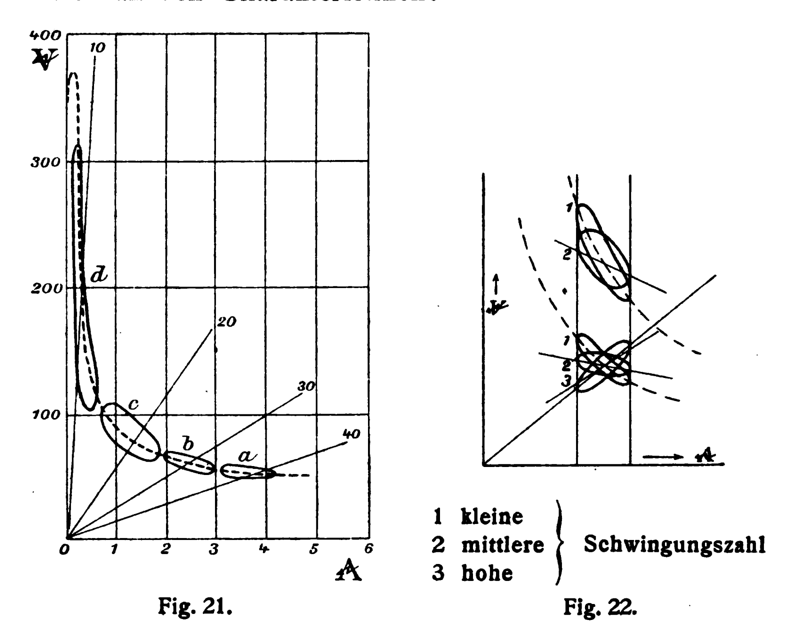



Fig. 21. Fig. 22.

Man findet für sie elliptische Formen von der Art, wie sie in Fig. 21 dargestellt sind. Mit wachsender Schwingungszahl verändert sich die Neigung der Ellipse mehr und mehr (Fig. 22), und zwar so, daß die ursprünglich vorhandene fallende Tendenz (Fig. 22, 1) schließlich in eine steigende (Fig. 22, 3) übergeht. Die Charakteristik behält somit bei niedrigen Schwingungszahlen die fallende Tendenz bei, die sie beim Gleichstromlichtbogen hat. Es gibt aber eine kritische Schwingungszahl, bei der die fallende Tendenz in steigende übergeht, bei der daher die schwingungserregende Kraft versagen muß.

Daraus folgt: Je kleiner die Lichtbogenhysteresis eines Lichtbogens gemacht werden kann, desto höhere Schwingungszahlen müssen erreicht werden können. So bedurfte es nur noch einer systematischen Prüfung der Umstände, welche die Lichtbogenhysteresis beeinflussen, um das gesteckte Ziel zu erreichen. Die Arbeit, in der die Hilfsmittel dazu klar angegeben werden konnten, erschien 1906.[1]

Bei dem Gedankengange dieser Untersuchungen wurde etwas ausführlicher verweilt, um Ihnen die Art zu demonstrieren, wie sich die wissenschaftliche Strategie durch sorgfältiges Erkunden des Geländes, durch Umgehungsversuche und Minierarbeit an die belagerte Festung heranschleicht, ehe sie zu dem entscheidenden Schlage ausholt. Es gibt aber auch eine andere, zwar weniger sichere, dafür aber oft rascher zum Ziel führende Methode, das ist die des Sturmlaufens durch direkt auf das praktische Ziel gerichtetes Probieren. Sie wurde im vorliegenden Falle von dem erfinderischen dänischen Ingenieur Poulsen angewandt, und es gelang ihm, eine wirksame Anordnung zur Erzeugung der ungedämpften Schwingungen auszuprobieren, ehe die Lehren der genannten Untersuchungen in die Praxis übertragen worden waren.[2] Wie schon so manchesmal, gelangte also diesmal die Taktik des Praktikers zuerst ans Ziel; dafür aber erreichte es die Taktik der Wissenschaft gleich an mehreren Stellen, und sie konnte jener ersten Methode sogleich einige weitere zur Seite

[1]) *H. Th. Simon, Zur Theorie des selbsttönenden Lichtbogens, Phys. Zeitschr. 7, 433, 1906.*

[2]) *W. Poulsen, Elektrotechn. Zeitschr. 27, 1040, 1906.*

stellen. Sie hat dabei gleichzeitig in weite, bis dahin dunkle Flächen des Lichtbogengebietes Klarheit gebracht. Auf alle Fälle erscheint es immer wieder als ein Glück, daß die Menschheit in ihrem Fortschritte nicht auf einen einzigen Weg und nicht auf einzelne Arbeiter angewiesen ist.

## II.

Um nunmehr zu einer Theorie des Lichtbogens[1]) zu gelangen, welche allen geschilderten Tatsachen gerecht wird, wollen wir uns in großen Zügen das allgemeine physikalische Weltbild vergegenwärtigen, welches zurzeit in der Wissenschaft die meisten Anhänger besitzt. Es ist aus drei Bausteinen errichtet, welche heißen:

Weltäther, Elektron, Atom.

Mit Weltäther bezeichnen die Physiker den leeren Raum, insofern er Träger physikalischer Erscheinungen ist. Denn erfahrungsgemäß ist der Raum imstande, allerlei Zwangszustände anzunehmen, ähnlich wie z. B. weicher Gummi elastische Spannungen annehmen kann. So beobachten wir, daß er der Sitz eines elektrischen Zwangszustandes werden kann und dadurch auf elektrisierte Körper die Ihnen wohlbekannten Kraftwirkungen ausübt. Als Quelle und Mittelpunkt dieses elektrischen Zwangszustandes sollen, so nimmt man an, im Äther von Anfang her die Elektronen vorhanden sein, das sind untereinander völlig gleiche und gleichgroße Atome der Elektrizität. Der Äther nimmt den elektrischen Zwangszustand nur ungern an und ist stets bestrebt, sich ihm nach Möglichkeit zu entziehen. Daher stoßen sich die Elek-

[1]) *J. Stark, Ann. d. Physik (4) 12, 673, 1903.*

tronen gegenseitig ab; denn durch ihre gegenseitige Annäherung würde ja der Äther gezwungen, einen immer höheren Grad des elektrischen Zwanges zu erdulden.

Die Elektronen sind, was man von solchen im reinsten Äther lebenden Gebilden gar nicht erwarten sollte, äußerst materiell veranlagt. Sie können zwar vorübergehend im Raume isoliert beobachtet werden, z. B. als sog. Kathodenstrahlen. Sonst aber besitzen sie eine natürliche Neigung, stets nur mit den materiellen Atomen und Molekülen vereinigt aufzutreten. Wahrscheinlich ist überhaupt jedes von den Atomen, aus denen die Chemie die Stoffe aufbaut, nichts anderes als ein kleines Weltsystem aus lauter umeinander kreisenden Elektronen. Wenigstens würden sich so die überaus komplizierten Lichterscheinungen verstehen lassen, welche die Spektroskopie als charakteristisch für die verschiedenen Atome nachweist. Wie dem auch sei: Jedenfalls sehen wir ein Atom im normalen unelektrischen Zustande als eine Verbindung eines oder mehrerer Elektronen mit einem materiellen Reste an. Wir können durch gewisse Hilfsmittel einen anomalen Zustand realisieren, bei dem ein oder mehrere Elektronen aus dem Atomverband herausgenommen sind. Alsdann scheint das zurückgebliebene Restatom positive elektrische Ladung zu haben, d. h. es erzeugt einen als positiv bezeichneten Zwangszustand in dem benachbarten Äther, während die weggenommenen Elektronen einen entsprechenden gleichgroßen negativen Zwang mit sich fort nehmen. Die beiden Zwangszustände verhalten sich also analog wie Zusammenpressung und Dehnung von Gummi. Jedes Elektron hat gewissermaßen seine Heimat

irgendwo in einem Atome oder Molekül. Es kann zwar durch mancherlei Prozesse aus dieser Heimat ausgetrieben werden und schweift so lange in der Welt umher. Aber seine Vertreibung hinterläßt eine Lücke, die sich als positiv elektrischer Zwangszustand im Äther darstellt. Daß bei jeder Erregung einer Art von Elektrizität stets eine genau gleichgroße der entgegengesetzten Art entstehen muß, ist eine von der Beobachtung schon früh festgestellte notwendige Folgerung aus dieser Hypothese. Die positiven Restatome nennt man positive Ionen. Auch kann ein Atom oder Molekül durch Beladung mit Elektronen zum negativen Ion werden.

Die Bande, welche das Elektron im Atom festhalten, sind nicht in allen Stoffen gleich fest geknüpft. In den Isolatoren sind sie am festesten, und es gelingt nur schwer, in ihnen die beiden Bestandteile zu trennen. Hierin besteht eben ihre isolierende Kraft. In den Leitern aber ist jenes Band ein ganz lockeres. Darum hat in ihnen die Elektrizität die Möglichkeit, zu wandern; ein elektrischer Strom ist nichts anderes als eine Elektronenschar auf Reisen. Doch unterscheiden sich die verschiedenen Leiter durch die Art, wie die Elektrizität in ihnen reist. Bei den besten Leitern, den Metallen, sind die Elektronen am genügsamsten und wandern auf Schusters Rappen und ohne Gepäck. D. h. bei den Metallen gibt es stets eine Anzahl von Elektronen, die sich in ihrer Atomheimat durch nichts gefesselt fühlen, und die unter dem Einfluß der kleinsten elektrischen Kraft davonlaufen, von einem Atom zum andern ziehen und so den elektrischen Strom bilden, wie wir ihn in Metalldrähten durch galvanische

Elemente und dergleichen auftreten sehen. Bei Salzlösungen oder Elektrolyten sind vornehme Sitten im Schwunge. Hier reisen die Elektronen nie ohne Fuhrwerk und Gepäck. Sie setzen sich auf ein Molekül und nehmen unter dem Einfluß einer elektrischen Kraft dieses Molekül auf der ganzen Reise mit. Mit anderen Worten: In Elektrolyten wird der elektrische Strom von Ionen gebildet, in die die Moleküle einer elektrolytischen Lösung zerfallen sind. Daher kommt es, daß in Elektrolyten ein Transport von Elektrizität nie ohne gleichzeitigen Transport von Materie möglich ist. Das äußert sich durch die bekannten Stoffabscheidungen, die an den Elektroden solcher Ströme beobachtet werden. Die Elektrochemie gründet sich auf dieses Verhalten.

Daß in beiden Fällen die Leitungsbahn sich erwärmt, ist ebenfalls leicht zu verstehen. Die Elektronen und Ionen erhalten unter dem Einfluß der wirkenden elektrischen Kräfte Geschwindigkeiten, genau wie ein gehobener Körper unter dem Einfluß der Schwerkraft. Prallen sie nun auf ihrem Wege mit neutralen Molekülen zusammen, wozu ihnen durch deren ungeheure Zahl reichlich Gelegenheit geboten ist, so übertragen sie die erlangte Geschwindigkeit nach den Stoßgesetzen auf dieselben. Da Geschwindigkeitsvermehrung der Molekülebewegung nach der bewährten kinetischen Theorie der Materie Temperaturerhöhung bedeutet, so ergibt sich die Erwärmung der Leitungsbahn eines elektrischen Stroms als unmittelbare Folgerung unserer Theorie.

Wie steht es jetzt, um auf den Lichtbogen zurückzukommen, mit der Elektrizitätsleitung in gasförmigen

Körpern? An sich sind die Gase Nichtleiter, aber wir haben eine Anzahl von Mitteln, ihre Moleküle in Ionen zu zerspalten und sie dadurch zu Leitern zu machen. Die wichtigsten dieser Mittel sind: Bestrahlung mit Röntgenstrahlung, Bestrahlung mit ultraviolettem Licht, Berührung mit radioaktiven Substanzen. Vor allen Dingen aber Bombardement mit Elektronen oder Ionen, was man Ionisierung durch Ionenstoß nennt: Wird ein neutrales Molekül von einem Elektron oder Ion heftig genug karamboliert, so verliert es vor Schreck jeden elektrischen Halt und zerfällt in ein positives und negatives Ion. Bis es sich von seinem Schreck erholt hat und seine Fassung wiederfindet, stehen seine Bestandteile, die Ionen, für die Bildung eines elektrischen Stromes zur Verfügung.

Setzen wir solche Möglichkeiten der Ionenbildung in Gasen voraus, so gibt es zwei prinzipiell verschiedene Wege, sie zur Wirkung zu bringen: Einmal kann man durch eine von dem Strome unabhängige Ionisierungsquelle bewirken, daß stets Ionen vorhanden sind, die einen Strom durch das Gas tragen können. In diesem Falle wird zwischen zwei auf einer Spannungsdifferenz gehaltenen Elektroden ein sogenannter unselbständiger Strom übergehen. Er ist durch das Auftreten der Sättigungsstromstärke charakterisiert. Der Strom kann nämlich nie größer werden, als bis er sämtliche durch die Ionisierungsquelle gebildeten Ionen an die Elektroden führt. So wird von einem gewissen Werte ab die Stromstärke unabhängig von der Spannungsdifferenz.

Die zweite Möglichkeit ist die, daß die Spannung oder der Strom selbst dauernd die Mittel zur Ionisierung des

Gases schafft. Man spricht dann von selbständiger Strömung.

Der Lichtbogen stellt einen Fall einer selbständigen Strömung dar. Wir betrachten zunächst eine andere Art solcher Strömung, um die Eigenart des Lichtbogens um so deutlicher heraustreten zu lassen. Wir denken uns an zwei durch ein Gas getrennte Elektroden eine elektrische Spannungsdifferenz angelegt, deren Wert wir beliebig wachsen lassen können. Einige wenige in Ionen zerfallene Moleküle dürfen wir immer in dem Gase erwarten, da ja überall Berührung mit radioaktiven Substanzen vorhanden ist. Diese Ionen werden in bekannter Weise unter dem Einfluß der elektrischen Kräfte Geschwindigkeit erhalten und mit neutralen Molekülen zusammenstoßen. Wird die Spannungsdifferenz groß genug, so muß schließlich jeder solche Zusammenstoß zu einer Zerspaltung des getroffenen neutralen Moleküls führen, d. h. zur selbständigen Neubildung von Ionen. Kurz: die vorhandenen wenigen Ionen erhalten auf elektrischem Wege die Kraft, sich zu vermehren. Und der einmal eingeleitete Prozeß muß dann bald zu beträchtlicher Leitungsfähigkeit des Gases führen.

Der in dieser Weise durch die Elektrodenspannung selbst ermöglichte Strom heißt Glimmstrom. Denn er findet sich mit einem charakteristischen glimmenden Leuchten des leitenden Gases verbunden. Nur die Moleküle des zwischen den Elektroden vorhandenen Gases sind an dem Vorgange beteiligt.

Erhöht man nun die Stromstärke des Glimmstroms noch weiter, so springt plötzlich die Glimmentladung in

die Lichtbogenentladung um, charakterisiert durch das Auftreten der weißglühenden Krater und die Beteiligung des Elektrodendampfes an der Stromübertragung.

Ich will Ihnen nun durch einige Versuche beweisen, daß es die Weißglut des negativen Kraters ist, welche dieser Entladungsform ihr typisches Gepräge gibt.

### Versuch 16 (nach G. Mie).

**Verbinden wir (siehe Fig. 23) mit einer der Elektroden der Lichtbogenstrecke durch eine biegsame Leitung eine Hilfselektrode und streichen nun mit derselben von der anderen Elektrode her langsam**

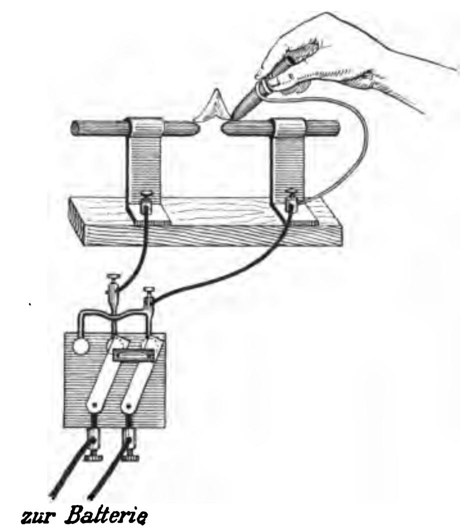



**Fig. 23.**

**über die Bogenstrecke, so greift der zwischen der Hilfselektrode und der zweiten Elektrode gebildete Lichtbogen nur dann auf die erste Elektrode über und bleibt bestehen, wenn die Hilfselektrode mit der positiven Seite verbunden ist. Denn alsdann braucht nur der positive, nicht aber der negative Krater seinen Platz zu wechseln.**

## Versuch 17.

Einem Kohlenstab a (Fig. 24) steht in 1—2 mm Abstand gegenüber die Spitze eines zweiten Kohlenstäbchens b, welches in einem Metallklotze c steckt. c wird durch eine Einschnappvorrichtung in der gezeichneten Lage festgehalten, fällt aber nach Lösen des Schnappers an einer nichtleitenden Führung d (z. B. zwei Glasstangen) hinunter, bis zur Berührung mit einer Sperrfeder f. In der oberen Stellung ist c ebenso in metallischem Kontakt mit einer Feder e, die leitend mit f verbunden ist. Der Kohlenstab a ist mit dem einen, das Federpaar ef mit dem anderen Pole einer Stromquelle von etwa 100 Volt verbunden, natürlich unter Zwischenschaltung geeigneten Widerstandes. Erregt man jetzt zwischen b und a in der oberen Stellung einen Lichtbogen und löst den Schnapper, so wird die Spannung einen

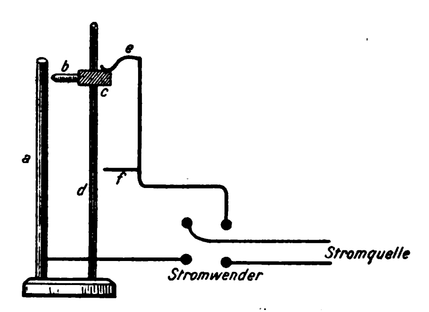



Fig. 24.

kurzen Moment von der Lichtbogenstrecke abgeschaltet, um bei Berührung von c mit f sogleich wieder angeschaltet zu werden. Man beobachtet nun, daß der Lichtbogen unter keinen Umständen in der unteren Lage neugebildet wird, solange der Stab a negative Elektrode ist. In diesem Falle müßte ja an einer ganz kalten Stelle des Stabes ein negativer Krater neugebildet werden. Wenn aber a positiv, also b negativ ist, so findet stets in der unteren Stellung Neuzündung des Lichtbogens statt, falls nicht die Fallzeit von e bis f einen bestimmten von der Lichtbogenlänge abhängenden Wert überschreitet. Diese Fallzeit läßt sich durch Verschieben der Feder f variieren. In diesem Falle hat der in der oberen Stellung an b gebildete negative Krater auch bei seiner Ankunft bei f noch genügend hohe Temperatur, um der vorhandenen Spannung eine Neuzündung zu gestatten. Mit anderen Worten: die Höhe des Zündgipfels wird entscheidend von der Temperatur der negativen Elektrode bestimmt.

Also der Lichtbogen zündet sich leicht, sobald man für Weißglut der negativen Elektrode sorgt. Weißglut der positiven Elektrode allein genügt nie zur Lichtbogenbildung. Wenn wir andererseits das Zustandekommen des negativen Kraters unmöglich machen, indem wir eine Flüssigkeit als negative Elektrode wählen, gelingt es uns nicht, den Lichtbogen zustande zu bringen.

Versuch 18.

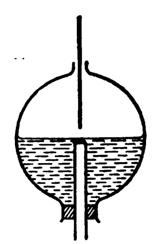


Fig. 25.

**Nach J. Stark und Casuto, Phys. Zeitschr. 5, 264, 1904 wählt man als die eine Elektrode ein wie Fig. 25 gestaltetes Glasgefäß, welches zur Hälfte mit verdünnter Schwefelsäure oder dergleichen gefüllt ist. Die Stromzuführung erfolgt durch den Hals. Die ganze Anordnung läßt sich in eine Handregulierlampe einspannen.**

Hierauf beruht die Tatsache, daß der bekannte Wehneltsche Stromunterbrecher nur dann arbeitet, wenn sein Platinstift Anode ist, wenn sich also kein Lichtbogen zwischen ihm und der umgebenden Flüssigkeit ausbilden kann.

Worin besteht nun aber die lichtbogenbildende Kraft der weißglühenden negativen Elektrode? Hier hat man folgende interessanten Tatsachen gefunden: Obschon in einem Metalle die Elektronen frei beweglich sind, bildet doch die Oberfläche für sie gewissermaßen eine Wand, durch die sie normalerweise nicht hindurchtreten können. Denn man kann das Metall sehr stark negativ laden, also die Elektronen heftig auf ihm komprimieren, ohne daß sie durch die Oberfläche austreten. Woher das kommt und welche Kraft sie dort zurückhält, weiß man noch nicht. Wohl aber weiß man,

daß diese Kraft mit zunehmender Temperatur abnimmt und völlig verschwindet, wenn man das Metall auf Weißglut erhitzt. Von all den Versuchen, die das beweisen, will ich Ihnen nur einen vorführen, dessen Grundlagen von Prof. Wehnelt[1]) herrühren (Versuch 19).

**Versuch 19.**

**Eine luftleer gepumpte Röhre (Fig. 26) hat eine mit Metalloxyd bedeckte Platinelektrode, die durch einen Akkumulatorenheizstrom auf helle Rotglut erhitzt werden kann. Eine zweite kalte Eisenelektrode steht dieser gegenüber. Schickt man durch eine solche Röhre mit Hilfe der beiden Elektroden einen Wechselstrom, den man in einem Oszillographen beobachtet, so zeigen sich Kurven wie Fig. 27: Es wird nur in derjenigen Halbperiode Strom durchgelassen, in der die glühende Oxydelektrode negativ ist.**

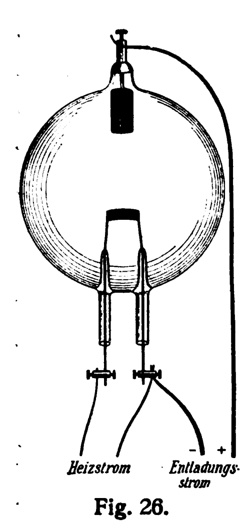



Fig. 26.

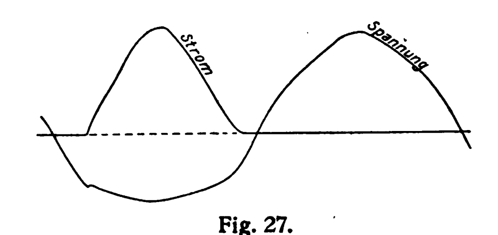



Fig. 27.

Die Anwendung auf das Lichtbogenphänomen liegt auf der Hand: Sobald der zunächst in der Gasstrecke auftretende Glimmstrom an der negativen Elektrode soviel Wärme entwickelt, daß die Oberfläche weißglühend wird, überschwemmt die Elektrode den Gasraum mit Elektronen, die nun durch Ionenstoß schnell zahl-

[1]) *A. Wehnelt, Physik. Zeitschr. 5, 680, 1904.*

reiche weitere Träger für den Strom schaffen. Die positiven Ionen fallen unter dem Einfluß der elektrischen Kraft auf den negativen Krater und schüren durch ihren Aufprall dauernd seine Glut. Denn wollte der Strom einmal nachlassen, so würde sofort vor der negativen Elektrode eine Verarmung an Elektronen eintreten, die Spannungsdifferenz würde wachsen, und die positiven Ionen würden mit erneuter Gewalt auf den negativen Krater geschleudert werden.

In ähnlicher Weise bedingt das Aufprallen negativer Ionen auf der positiven Elektrode den positiven Krater. Ob und in welcher Ausdehnung er zustande kommt, hängt indes noch von speziellen Umständen, z. B. davon, ab, ob die positiven oder negativen Ionen die größere Beweglichkeit haben. Das wechselt ganz, je nachdem wir dieses oder jenes Gas betrachten. Denn, meine Damen und Herren, die Ionen sind weibliche Geschöpfe, und Sie mögen sich vorstellen, daß es da emanzipierte gibt, mit fußfreien Reformröcken, in denen sie geschäftig dahineilen, daß es aber auch modische gibt, die in ihren Humpelröcken nur langsam von der Stelle rücken.

Zusammenfassend dürfen wir jetzt sagen: Der elektrische Lichtbogen ist eine selbständige Gasentladung, dessen ionenbildende Kraft in dem vom Strome selbst in Weißglut gehaltenen negativen Krater liegt. Ihr unselbständiges Ebenbild haben wir in dem Wehneltschen Versuche (19) kennen gelernt, bei dem die Weißglut der negativen Elektrode durch eine besondere Heizung unterhalten wurde.

Die entworfene Theorie des Lichtbogens erklärt zwanglos alle im ersten Teile vorgeführten Eigenschaften. Sie

erklärt vor allem die Notwendigkeit des Zündgipfels und den späteren Fall der Charakteristik und damit auch alles, was wir aus diesem Verhalten ableiten. Der Unterschied zwischen Metallen und Kohle folgt dann ohne weiteres aus dem großen Unterschied in der Wärmeableitung bei beiden: Bei Metallen ist sie um vieles größer, daher muß eine viel größere Spannungsdifferenz angewendet werden, ehe die Bildung des negativen Kraters möglich wird. Diesen Unterschied kann man in interessanter Weise ausnutzen, um Lichtbögen mit gleichrichtender Kraft zu erhalten, mit Kräften also, wie wir sie bei dem Wehneltschen Versuche (19) demonstrierten. So läßt z. B. ein Lichtbogen zwischen Kohle und Kupfer den Strom nur in der Richtung durchtreten, in der die Kohle negative Elektrode wird. (Fig. 28 zeigt die an einem solchen unsymmetrischen Lichtbogen beobachteten Strom-

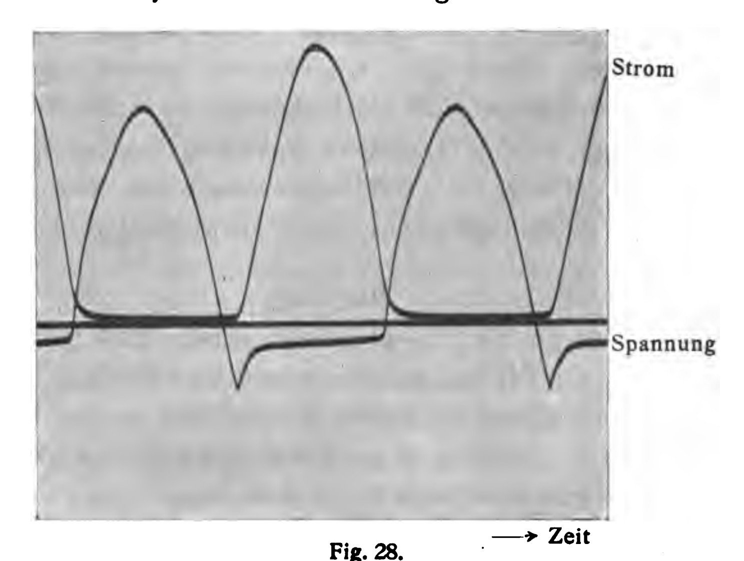



Fig. 28.

und Spannungskurven.) Diese gleichrichtende Kraft des Lichtbogens findet in neuerer Zeit immer ausgedehntere Verwendung, worauf nachher zurückzukommen ist.

Wie erklärt unsere Lichtbogentheorie die Lichtbogenhysteresis? — Man versteht sie leicht, wenn man bedenkt, daß der negative Krater eine gewisse Zeit braucht, bis er sich bildet und bis er sich, einmal gebildet, wieder abkühlt. Versuch 17 hat das ja direkt demonstriert. Darum muß die Charakteristik des Wechselstromlichtbogens bei steigendem Strome mit höheren Spannungsdifferenzen verlaufen als bei sinkendem. Denn der bei steigendem Strome gebildete Krater wirkt noch mit seiner elektronenbefreienden Kraft nach, wenn der Strom hinterher abnimmt. Kehrt die Spannungsdifferenz ihre Richtung so schnell um, daß sie die nun zur negativen Elektrode werdende Spitze noch heiß, den Zündgipfel also niedrig genug vorfindet, dann entsteht der Lichtbogen sofort wieder mit umgekehrter Stromrichtung. Bei Metallen kühlen sich die Elektroden so schnell ab, daß nur bei äußerst schnellem Spannungswechsel jene Bedingung erfüllt ist. Bei ihnen kann also nur ein Wechselstromlichtbogen sehr hoher Schwingungszahl bestehen.

III.

Nachdem wir uns so überzeugt haben, daß unsere Theorie in der Tat alle am Lichtbogen beobachteten Tatsachen befriedigend beschreibt, wenden wir uns zu unserem letzten Abschnitt, einer kurzen Übersicht über die Anwendungen des Lichtbogens.

1. Die wärmeerregende Kraft wird mannigfach zu

Heizungszwecken ausgenutzt. So hat z. B. die Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft in Berlin einen Lötkolben in den Handel gebracht, der durch einen in einer Kapsel eingeschlossenen Lichtbogen angeheizt wird. Der Lichtbogen geht von einer Kohlenelektrode zum Kupfer des Kolbens, welches sich bald in seinem ganzen Volum auf Löttemperatur erhitzt (Versuch 20). — Auch ein elektrisches Schweißverfahren gründet sich auf die wärmeerregende Kraft des Lichtbogens. Die zu schweißenden Stücke werden beide als negative Pole in einen Trog mit verdünnter Schwefelsäure getaucht, welche durch Vermittlung einer Bleiplatte positive Elektrode ist. Es bilden sich alsbald Lichtbögen zwischen den Schweißstücken und der Säure, welche die Schweißstücke bis auf Weißglut erhitzen, so daß man sie leicht verschweißen kann. Der Versuch läßt sich in kleinem Maßstabe leicht demonstrieren (Versuch 21). — Vor allen Dingen aber hat man Lichtbogenschmelzöfen konstruiert, die in allen Dimensionen in Laboratorien und Fabriken in Gebrauch sind. Namentlich bei der Karborundum- und Kalziumkarbidherstellung werden solche Öfen bis zu Größen gebaut, in denen einige tausend Pferdekräfte elektrischer Energie auf einen einzigen gewaltigen Lichtbogen konzentriert sind.

2. Die Ausnutzung der lichterregenden Kraft des Lichtbogens haben wir täglich Gelegenheit, in größtem Maßstabe zu beobachten. Tausende von Bogenlampen erhellen ja unsere Straßen, Plätze, Bahnhöfe, Säle! Auf Demonstrationen darf ich hier wohl verzichten, will aber einige prinzipiellen Gesichtspunkte hervorheben, die in Frage kommen: Die ersten und einfachsten Bogenlampen

sind die in der Atmosphäre zwischen Kohlenstiften brennenden, wobei man sich lange um die Fabrikation möglichst gleichmäßig und ohne Zischen abbrennender Kohlenstifte bemühte. Wegen des atmosphärischen Sauerstoffes findet hier ein sehr rasches Verbrennen der Kohle statt, und der Kohlenverbrauch ist groß. Die Lampen müssen alle paar Stunden neue Kohlen eingesetzt bekommen.

Um den „Abbrand“ zu vermeiden, hat man den Lichtbogen unter Luftabschluß oder in seinen eigenen Verbrennungsgasen brennen lassen. Das Resultat sind die sogenannten Dauerbrandlampen, die mit einer einzigen Kohlenfüllung einige hundert Stunden brennen können. Das Licht dieser Lampen ist violetter als das der gewöhnlichen, woran der Eingeweihte sie sofort erkennt, auch brennen die Kohlen mit anderer Form ab, was unter Umständen eine bessere Lichtverteilung ergibt.

Ein weiterer Schritt zur Vervollkommnung war, daß man unverbrennliche kalk- oder porzellanartige Stoffe den Kohlenstiften beimengte. Die aus den Kratern ausgeworfenen Elektrodengase enthalten dann in sehr feiner Verteilung jene Teilchen in hoher Weißglut, so daß nun der ganze Lichtbogen in hellem, mehr oder weniger gefärbten Lichte strahlt. Solche „Flammenbogenlampen“ sieht man jetzt überall, da sie in der Tat die lichterregende Kraft des Kohlelichtbogens am ökonomischsten ausnutzen.

Auch der Quecksilberlichtbogen wird neuerdings in wachsendem Maße zu Beleuchtungszwecken herangezogen, wo es nicht auf die Farbenveränderung ankommt, die er hervorruft. Denn er liefert eine Beleuchtung von relativ

hohem Nutzeffekt. Seit Heraeus in Hanau die Technik des Quarzglases ausgebildet hat, macht man die Gefäße wohl auch aus Quarz. Sie halten dann einem hohen inneren Druck des Quecksilberdampfes Stand und entsenden darum mehr rotes Licht als die gewöhnlichen Quecksilberlampen. Die Farbe der Gegenstände wird von dem Lichte dieser Quarzlampen in geringerem Maße verändert. Die Quarzlampen gewinnen auch dadurch immer mehr an Bedeutung, daß sie das ganze ultraviolette Licht des Quecksilberdampfes austreten lassen, welches sonst vom Glase zurückgehalten wird. Wie man weiß, ist dieses Licht imstande, beträchtliche chemische Arbeit zu verrichten. Auch hat Prof. Coehn in Göttingen neuerdings gezeigt[1]), daß ein Gemisch aus schwefliger Säure und Luft durch das ultraviolette Licht einer Quarzlampe in großer Menge zu Schwefelsäure gemacht wird. Das Verfahren dürfte große Aussichten für die Zukunft besitzen.

Auch für medizinische Zwecke hat, wie man weiß, das vom Lichtbogen gelieferte ultraviolette Licht neuerdings segensreiche Verwendung gefunden.

3. Von der schallerregenden Kraft des Lichtbogens direkt hat man in der Praxis noch wenig Gebrauch gemacht. Wohl aber von seiner Begleiterscheinung, dem sprechenden Licht. Das Licht nämlich, welches der sprechende Lichtbogen aussendet, flutet in seiner Stärke genau so auf und ab wie die Schallwellen des gesprochenen Wortes. Verwendet man also einen

---

[1]) *A. Coehn, Zeitschr. f. physikal. Chemie 70, 88, 1909.*

sprechenden Lichtbogen als Sender der von Bell erfundenen Lichttelephonie, d. h. sendet man es mit Hilfe eines Scheinwerfers in die Ferne und fängt es auf einer mit Telephon und Batterie verbundenen Selenzelle auf (Fig. 29), so wird das sprechende Licht wieder in Schall verwandelt[1]).

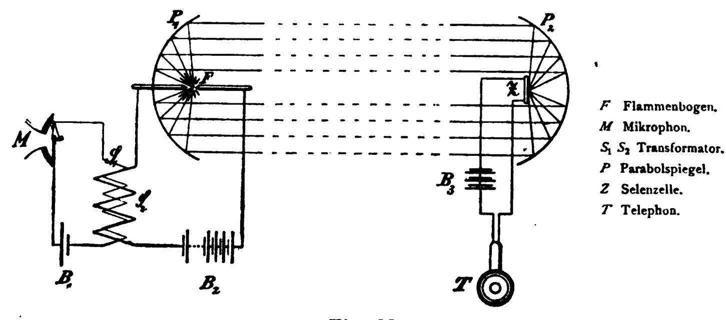



Fig. 29.

Eine Selenzelle nämlich ändert ihren Leitungswiderstand mit der Intensität des auffallenden Lichtes. Durch diese Verwendung des sprechenden Lichtbogens in dem Bellschen Versuche konnte ich seinerzeit eine Entfernung von 4 km lichttelephonisch überbrücken, spätere von anderer Seite unternommene Versuche haben diese Entfernung auf rund 10 km gesteigert[2]). Indessen dürfte das Verfahren kaum große praktische Zukunft haben, da ja der geringste Nebel seine Anwendbarkeit aufhebt.

4. Die gleichrichtende Kraft des Lichtbogens findet in neuerer Zeit vielfache Anwendung, wo es gilt,

[1]) *H. Th. Simon, Physik. Zeitschr. 2, 253, 1901. H. Th. Simon und M. Reich, Physik. Zeitschr. 3, 278, 1901.*

[2]) *E. Ruhmer, Elektrotechn. Zeitschr. 23, 859, 1902.*

aus Wechselstromanlagen Akkumulatoren, z. B. die eines elektrischen Automobils, zu laden. Man verwendet dazu den Quecksilberlichtbogen in folgender Form und Schaltung (Fig. 30).

Man sieht, daß in dem Zweig „Gleichstrom“ stets die selbe Stromrichtung festgehalten wird, weil die glühelektrische Wirkung des einmal gebildeten negativen Kraters nur in diesem Sinne einen Stromdurchgang mit kleiner Spannung gestattet.

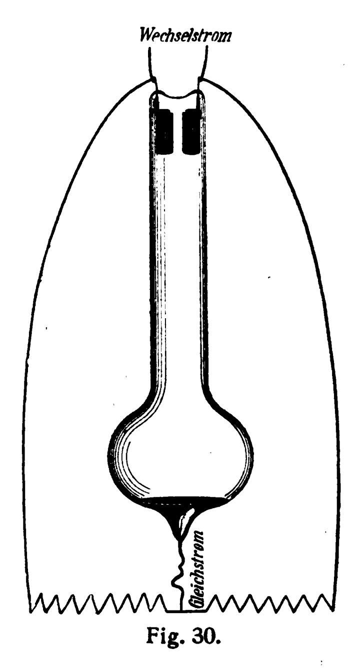


Fig. 30.

5. Von der stickstoffbildenden Kraft wollten wir nicht weiter sprechen, dagegen soll über

6. die schwingungserregende Kraft noch einiges gesagt und gezeigt werden. Zwar geht es nicht an, heute noch die verschiedenen Wege zu erörtern, welche die einzelnen Systeme der drahtlosen Telegraphie in der Ausnutzung dieser schwingungserregenden Kraft einschlagen, obwohl sich gerade hier die Kraft unserer Lichtbogentheorie besonders bewähren würde. Wir wollen aber zum Schluß wenigstens noch zeigen, wieweit man heute in der Erzeugung ungedämpfter Schwingungen gekommen ist. Die Methode, die wir verwenden, ist die von Poulsen ausprobierte, von der hiesigen Firma C. Lorenz

zu hoher Vollkommenheit entwickelte. Der Lichtbogen befindet sich in einem starken Magnetfeld und brennt in Leuchtgas, was beides seine Lichtbogenhysteresis beträchtlich herabsetzt. Er hat eine positive Kupferelektrode, eine negative Kohlenelektrode, weil die Ventilwirkung dieser Kombination die Erregung der Schwingungen begünstigt. Einige Versuche mögen Ihnen die Wirkungen der Schwingungen selbst zeigen[1]).

### Versuch 22.

Versuchsschema Fig. 31. Bei F ein von der Firma C. Lorenz freundlichst zur Verfügung gestellter Poulsengenerator. Betriebsspannung 400—500 Volt. Stromstärke ca. 20 Ampere. Die Schwingungen sind um so regelmäßiger, je größer L und je kleiner der wirksame Regulierkondensator $C_2$. $C_1$ ist ein großer „Blockkondensator", der einen Kurzschluß in $C_2$ verhindert. Resonanzspule R besteht aus etwa 600 Windungen eines 0,5 mm dicken Drahtes auf einer 20 cm dicken und 50 cm langen Papptrommel (vgl. Versuch 13). Wellenlänge der Eigenschwingung ca. 3000 m. Sie ist durch 5 Windungen des $LC_2$-Kreises lose mit diesem gekoppelt.

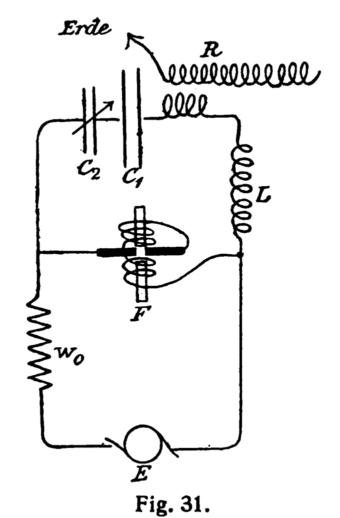


Fig. 31.

a) Eine Spitze am Ende der Resonanzspule zeigt bei Regulierung von $C_2$ auf Resonanz gewaltige verästelte Büschel. Die genaue Abstimmung läßt sich wegen der „Kapazitätsempfindlichkeit" von Spulen auch durch Annäherung oder Entfernung der Hand von der Resonanzspule erreichen (vgl. Versuch 13). Ein Flugrad auf der Spitze gerät in schnelle Rotation und zeichnet wundervolle sprühende Rotationsflächen im Raume. Die Büschelentladung aus einer brennen-

[1]) *H. Th. Simon, Physik. Zeitschr. 9, 865, 1908.*

den Bunsenflamme hat eine besonders eigentümliche Form. Nimmt man einen Leiter in die Hand, so kann man aus dem Ende der Resonanzspule Lichtbögen von 20—30 cm Länge ziehen, ohne etwas zu empfinden. Aus isolierten Metallmassen in der Nähe lassen sich in derselben Weise große Lichtbögen ziehen. Zwei Menschen in der Nähe können zwischen in die Hände genommenen Kohlen einen Lichtbogen übergehen lassen. Verbindet man das Ende der Resonanzspule mit einem seitlich aus einer Flasche fließenden Wasserstrahle, so entsteht ein Lichtbüschel an der Stelle, wo der Strahl zerstäubt. Diese Stelle rückt um so näher an die Ausflußdüse heran, je mehr auf Resonanz eingestellt wird; dabei hebt sich der Strahl. Man kann aus dem Strahl wie aus dem metallischen Spulenende lange Lichtbögen ziehen.

b) Evakuierte Röhren, z. B. auch Glühlampen, die man am Glase anfaßt, zeigen noch in großer Entfernung Glimmlicht. Versieht man eine Glühlampe an den Polen mit Handgriffen, die von zwei radial zum Ende der Resonanzspule stehenden Menschen gefaßt werden, so leuchtet die Lampe hell auf. Ergreift man den einen Handgriff und berührt mit dem anderen eine isolierte Metallmasse in der Nähe der Resonanzspule, so leuchtet die Lampe. Kommt man mit einem nassen Holzstabe, nassem Papier oder nassem Bindfaden in die Nähe des Spulenendes, so verdampft zunächst das Wasser, bis an den Stellen des größten Leitungswiderstandes Blitzfiguren entstehen, die das Material entzünden.

c) Schaltet man in den Schwingungskreis direkt 10 bis 15 parallel geschaltete Glühlampen ein, so geraten sie in helle Glut, man kann so bis $1^1/_2$ Kilowatt (bei ganz großen Lampen bis 4 Kilowatt) Schwingungsenergie entziehen. Ebenso läßt sich eine Kohlenbogenlampe im Schwingungskreise durch die Schwingungsenergie in helles Brennen bringen und bis zu 0,5 cm Bogenlänge ausziehen. Die Regelmäßigkeit der Schwingungen zeigt sich schön an einer Geißlerschen Röhre, die man schnell im Felde bewegt oder mit Hilfe eines Elektromotors in einem Drahtkreise rotieren läßt, der mit der Resonanzspule verbunden ist (vgl. Versuch 12). Im Gegensatz zu jenem Versuche erzeugt die rotierende Röhre hier eine ununterbrochen leuchtende Scheibe; ein Beweis, daß in der Tat ununterbrochene Schwingungen unterhalten werden.

---

Wir sind am Ziel!

Um zu den Schätzen zu gelangen, die in der Tiefe der Natur schlummern, hat der menschliche Geist verstanden, Schächte zu graben und Stollen zu treiben, und es ist, wie Sie wissen, an vielen Stellen gelungen, ergiebige Erzadern bloßzulegen. Meine Aufgabe war, Ihnen bei einer Einfahrt in ein solches Bergwerk des Geistes Führer zu sein und Sie einen Blick werfen zu lassen auf die Stätten, wo die Wissenschaft in heißem Bemühen nach ihrem Golde schürft. Möchten Sie lebendige und nachhaltige Eindrücke von diesem Ausfluge mit nach Hause nehmen!

---



Der Lichtbogen zwischen Kohlenelektroden
(oben positiver, unten negativer Pol).

Reproduktion einer auf Grund von Autochromphotographien angefertigten Pastellzeichnung des Verfassers.

Simon, Der elektrische Lichtbogen. Verlag von S. Hirzel in Leipzig.

